

## АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ЛЕВИТАЦИОННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Г. С. КЕРИМЗАДЕ, Г. В. МАМЕДОВА

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,  
AZ 1010, Баку, Азербайджан  
E-mail: gulaya68@mail.ru

Современный уровень развития техники расширил область применения электрических аппаратов с левитационными элементами, используемых для точной стабилизации переменного тока в регулируемых нагрузках, автоматического контроля неэлектрических параметров технологических процессов и т.д. Получены аналитические выражения для оптимизации и анализа параметров. Наличие безразмерных величин упрощает расчеты и построение взаимосвязей между параметрами в явной форме. На основе полученных взаимосвязей разработаны рекомендации к проектированию различных электрических аппаратов с левитационными элементами.

**Ключевые слова:** электрический аппарат, левитационный элемент, магнитопровод, обмотка возбуждения, показатель параметров, тепловая устойчивость, площадь поперечного сечения, оптимальные размеры

**Введение.** Электрические аппараты с левитационными элементами (ЭАЛЭ) выполняют функции измерения, управления и стабилизации электрических и неэлектрических величин [1—9]. К настоящему времени разработаны электромагнитные устройства с левитационными элементами различного функционального назначения [2], которые имеют простые конструкции, высокие стабильность и точность рабочих характеристик. Основными элементами ЭАЛЭ являются магнитопровод 1, обмотка возбуждения (ОВ) 2, выполненная из нескольких переключаемых секций и последовательно подключенная к источнику переменного напряжения  $U_1$ , а также левитационный элемент (ЛЭ) 3 (рис. 1, а — прямая, б — ступенчатая магнитная система с левитационными элементами), выполненный из алюминия в виде короткозамкнутой сплошной рамки или обмотки из медных проводов.

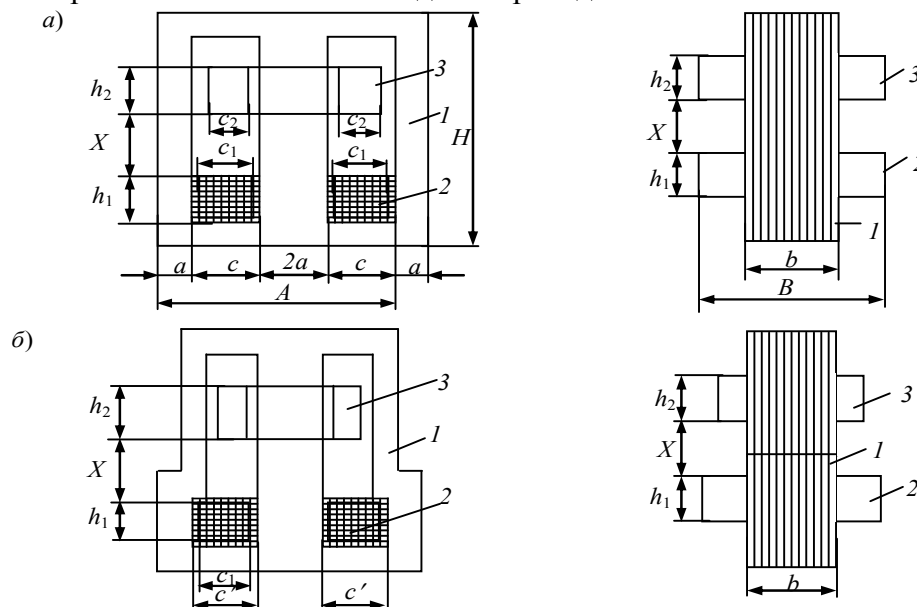


Рис. 1

**Постановка задачи.** Анализ работ [1—5] показывает, что ЭАЛЭ различаются по назначению и массогабаритным характеристикам, что усложняет их проектирование. С целью определения общих для ЭАЛЭ показателей в работах [1—5] проанализированы методы их расчета и исследования. К таким показателям относятся: режимы токов усилия, координата левитации, рабочий ход подвижной части, подъемная сила, электромагнитная жесткость, грузо-подъемность, электромагнитное давление, теплостойкость и т.д. В настоящей работе в качестве показателя ЭАЛЭ рассмотрена тепловая устойчивость левитационного элемента (рис. 1, 3).

**Тепловая устойчивость ЛЭ.** Если при подключении ОВ к источнику питания через ОВ и ЛЭ протекают токи, превышающие номинальные значения, увеличиваются потери ЛЭ, теплопередача увеличивается незначительно и вся энергия ЛЭ идет на его нагрев. Согласно закону теплообмена, превышение температуры составляет [2]:

$$\frac{d\tau}{dt} = K_g \frac{I_2^2 R_2}{mc} = \frac{2R_2 K_g}{cg} \left( \frac{F_3}{m} \right), \quad (1)$$

здесь  $g = 9,8$  Н/м;  $c$  и  $m$  — теплоемкость материала и масса ЛЭ;  $I$  — ток;  $R$  — сопротивление;  $K_g$  — коэффициент пропорциональности.

При условии  $F_3 = ma$  получаем:

$$\frac{\left( \frac{d\tau}{dt} \right)}{a} = \frac{2r_2 K_g}{cg}. \quad (2)$$

Таким образом, при заданных геометрических размерах магнитной системы отношение изменения температуры ЛЭ к ускорению, с которым ЛЭ движется под действием электромагнитной силы, пропорционально омическому сопротивлению ЛЭ. Поскольку температура может быть значительной, во избежание разрушения, минимальные размеры ЛЭ не должны быть меньше установленных. Установившееся превышение температуры перегрева ЛЭ можно определить из выражения:

$$\tau_y = \frac{I_2^2 R_2}{K_T S_2} = \frac{\Delta_{ок} \tau_T}{1 - \alpha \tau_T} = \frac{\tau_{доп}}{\Delta_{ок} + \alpha \tau_{доп}}. \quad (3)$$

Допустимое значение температуры  $\tau_{доп}$  определяется исходя из материала или класса изоляции. Коэффициент  $\Delta_{ок}$  учитывает температуру окружающей среды:

$$\Delta_{ок} = 1 + \alpha(\theta_{ок} - \theta_{20}) = 1 + 0,0042(35 - 20) = 1,063.$$

Температура  $\tau_T$  определяется геометрическими размерами ЛЭ:

$$\tau_T = \tau_{T0} \frac{K_i^2}{n_{e2}} b_2^2 = \tau_{T0} A_1 b_2^2; \quad (4)$$

$$\tau_{T0} = \frac{g\gamma\rho_0}{k_T\mu_0}; \quad n_{e2} = \frac{h_2}{c_2}; \quad A_1 = \frac{K_i^2}{1 + n_{e2}}; \quad (5)$$

$$K_i = \sqrt{\frac{\mu_0 b_2}{c_2 \lambda}}. \quad (6)$$

Соотношения размеров ЛЭ определяются значениями температуры экрана  $\tau_{T0}$ ,  $\tau_T$ :

$$n_{e2} = \frac{\tau_{T0}}{\tau_T} \left( K_i^2 b_2^2 n_p \right) - 1. \quad (7)$$

Из выражения (7) видно, что снизить температуру перегрева ЛЭ можно, уменьшив  $n_{e2}$ , т.е. толщина ЛЭ ( $c_2$ ) должна быть меньше, а высота ( $h_2$ ) больше (при условии  $S_{02} = c_2 h_2 = \text{const}$ ).

Значение  $n_{e2} = h_2/c_2$  зависит от геометрических размеров магнитопровода, физико-технических характеристик материала ЛЭ и температуры  $\tau_{ЛЭ}$ . Согласно [2],

$$n_{e2} = n_0 m_{20} \left( \frac{\rho_2}{\tau_2} \right), \quad (8)$$

где

$$n_0 = \frac{4b_2^2}{k_T} g \gamma n_k; \quad m_{20} = \frac{1,1(2m_a + 2m_c + 2m_a m_c)^2}{m_a(2m_a + 2m_c + m_a m_c + 1,818m_a)\lambda}. \quad (9)$$

Значения  $\lambda$ ,  $m_{20}$  и  $n_{e2}$  зависят от безразмерных величин  $m_a = b/a$ ,  $m_c = b/c$ . Для ЛЭ из алюминия и меди:

$$\frac{\rho_2}{\tau_2} = \frac{\rho_{20}(\Delta_{ок} + \alpha\tau_2)}{\tau_2} = \frac{2,8 \cdot 10^{-8}}{\tau_2} (1,063 + 0,0042\tau_2), \quad (10)$$

$$\frac{\rho_2}{\tau_2} = \frac{\rho_{20}(\Delta_{ок} + \alpha\tau_2)}{\tau_2} = \frac{1,72 \cdot 10^{-8}}{\tau_2} (1,0645 + 0,0043\tau_2). \quad (11)$$

Для ЛЭ из алюминия и меди соответственно:

$$n_0 = \frac{4}{18} \cdot 0,98^2 \cdot 9,81 \cdot 2,7 \cdot 10^3 = 7,823 \cdot 10^3$$

$$n_0 = \frac{4}{13} \cdot 0,98^2 \cdot 9,81 \cdot 8,9 \cdot 10^3 = 25,789 \cdot 10^3. \quad (12)$$

Здесь  $n_k = 1 + \frac{P_n}{P_T}$ .

При отсутствии силы тяжести вес крайних элементов  $P_n=0$ , а  $n=1$ , но при наличии силы  $P_x$   $n=2-4$ .

**Определение оптимальных размеров магнитопровода.** Площадь поперечного сечения среднего стержня  $S_c = 2ab$  постоянна и определяется через заданные значения напряжения питания и магнитной индукции в материале. Учитывая постоянство  $S_c$ , определяем оптимальные размеры стержней магнитопровода  $a$  и  $b$ . В этом случае периметр поперечного сечения  $\Pi_c$  приобретает минимальное значение, так как:

$$\Pi_c = 2(2a + b) = 2a(1 + m_a) + 2a = N_c \sqrt{2S_c}, \quad (13)$$

$$a = \sqrt{\frac{S_c}{2m_a}} = \frac{\sqrt{2S_c}}{2\sqrt{m_a}}; \quad b = \sqrt{S_c \frac{m_a}{2}}; \quad N_c = \frac{2 + m_a}{\sqrt{m_a}}, \quad (14)$$

то, используя производную  $N_c$  от  $m_a$ , получаем:

$$\frac{dN_c}{dm_a} = \frac{d}{dm_a} \left( \frac{2 + m_a}{\sqrt{m_a}} \right) = 0; \quad \sqrt{m_a} - \frac{2 + m_a}{2\sqrt{m_a}} = 0. \quad (15)$$

Откуда определяем оптимальное значение коэффициента  $m_a = b/a=2$ . При  $m_a = 2$  значение  $\Pi_c = \Pi_{c,\min}$ , так как при этом  $N_c = N_{c,\min}$  и

$$N_{c,\min} = \frac{2+2}{\sqrt{2}} = 2,828,$$

$$\Pi_{c,\min} = 2,828 \sqrt{2S_c} = 4,073 \sqrt{S_c}. \quad (16)$$

Тогда оптимальные значения:

$$a = \sqrt{\frac{S_c}{2m_a}} = \sqrt{\frac{S_c}{2 \cdot 2}} = \sqrt{0,25S_c}; \quad b = \sqrt{S_c \frac{m_a}{2}} = \sqrt{S_c}. \quad (17)$$

Если задать  $m_a = 1$  и  $4$ , то в обоих случаях получим  $N_c = 3$ . На рис. 2 приведены зависимости  $N_c(m_a)$  и  $P_c(m_a)$ . При  $m_a = 2$  активные сопротивления обмотки возбуждения и ЛЭ будут также минимальными, т.е. потери уменьшаются до минимума.

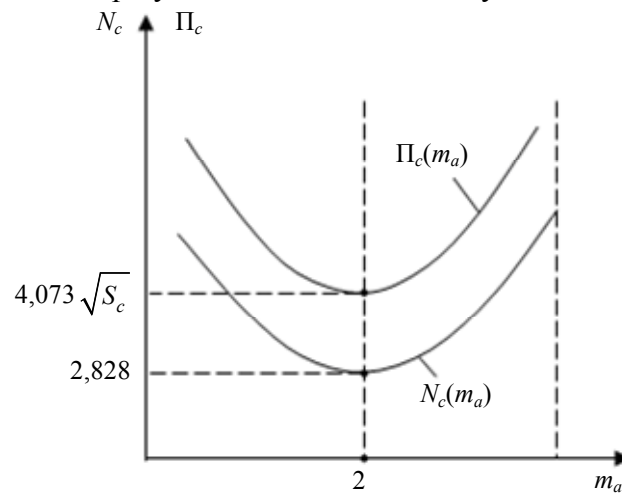


Рис. 2

**Закключение.** Полученные аналитические выражения обобщенных параметров позволяют упростить проектирование ЭА различного функционального назначения, которые отличаются простотой конструкции, высокой стабильностью и точностью рабочих характеристик.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллаев Я. Р. Теория и применение многофункциональных линейных индукционных подвесов. Баку: Военное издательство, 1996. 300 с.
2. Абдуллаев Я. Р. Теория магнитных систем с электромагнитными экранами. М.: Наука, 2000. 288 с.
3. Абдуллаев Я. Р., Мамедова Г. В., Керимзаде Г. С. Расчет электромеханических силовых исполнительных преобразователей с левитационными экранами // Электричество. 2007. № 3. С. 27—36.
4. Буль Б. К., Абдуллаев Я. Р., Гераськов В. Л. Электромагнитные устройства на принципе индукционной подвески // Электричество. 1975. № 8.
5. Хофман Д. Техника измерений и обеспечение качества. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1983.
6. Керимзаде Г. С. Определение оптимальных геометрических размеров стабилизатора переменного тока с учетом температуры перегрева обмоток // Электротехника. 2013. № 9. С. 40—43.
7. Керимзаде Г. С., Мамедова Г. В. Рабочие режимы проектирования электрических аппаратов с индукционными левитационными элементами // Изв. вузов. 2015. Т. 17, № 1.
8. Абдуллаев Я. Р., Керимзаде Г. С., Мамедова Г. В., Пириева Н. М. Проектирование электрических аппаратов с ЛЭ // Электротехника. 2015. № 5. С. 16—22.

**Сведения об авторах**

Гюльшен Санан кызы Керимзаде

— канд. техн. наук, доцент; Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, кафедра электромеханики  
E-mail: gulaya68@mail.ru

Гюляя Вейсал кызы Мамедова

— канд. техн. наук, доцент; Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, кафедра электромеханики  
E-mail: gulaya68@mail.ruПоступила в редакцию  
27.12.17 г.

**Ссылка для цитирования:** Керимзаде Г. С., Мамедова Г. В. Анализ параметров электрических аппаратов с левитационными элементами // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 12. С. 1067—1071.

## ANALYSIS OF PARAMETERS OF ELECTRIC DEVICES WITH LEVITATION ELEMENTS

G. S. Kerimzade, G. V. Mamedova

Azerbaijan State Oil and Industry University,  
AZ 1010, Baku, Azerbaijan  
E-mail: gulaya68@mail.ru

The modern level of development of technique even more expanded a scope of electrical devices with levitation elements, used for exact stabilizing of an alternating current in adjustable loadings, automatic monitoring of not electrical parameters of technological processes, etc. Analytical expressions for parameter optimization and analysis are derived. The presence of dimensionless quantities simplifies the calculation and construction of relationships between the parameters in an explicit form. Based on the obtained relations, recommendations to design of various electric devices with levitation elements are developed.

**Keywords:** electric device, levitation element, magnetic conductor, excitement winding, indicator of parameters, thermal stability, cross-sectional area, optimum size

## REFERENCES

1. Abdullaev Ya.R. *Teoriya i primeneniye mnogofunktsional'nykh lineynykh induktsionnykh podvesov* (Theory and Application of Multipurpose Linear Induction Suspensions), Baku, 1996, 300 p. (in Russ.)
2. Abdullaev Ya.R. *Teoriya magnitnykh sistem s elektromagnitnymi ekranami* (Theory of Magnetic Systems with Electromagnetic Screens), Moscow, 2000, 288 p. (in Russ.)
3. Abdullaev Ya.R., Mamedova G.V., Kerimzade G.S. *Elektrichestvo*, 2007, no. 3, pp. 27–36. (in Russ.)
4. Bul' B.K., Abdullaev Ya.R., Geras'kov V.L. *Elektrichestvo*, 1975, no. 8. (in Russ.)
5. Hoffmann D. *Handbuch Meßtechnik und Qualitätssicherung*, 1986.
6. Kerimzade G.S. *Russian Electrical Engineering*, 2013, no. 9, pp. 40–43. (in Russ.)
7. Kerimzade G.S., Mamedova G.V. *Transactions of Azerbaijan Institutes of Technology*, 2015, no. 1(17).
8. Abdullayev Y.R., Kerimzade G.S., Mamedova G.V., Piriyeva N.M. *Russian Electrical Engineering*, 2015, no. 5(86), pp. 252–257.

**Data on authors**

- Gulshen S. Kerimzade** — PhD, Associate Professor; Azerbaijan State Oil and Industry University, Department of Electromechanics; E-mail: gulaya68@mail.ru
- Gulaya V. Mamedova** — PhD, Associate Professor; Azerbaijan State Oil and Industry University, Department of Electromechanics; E-mail: gulaya68@mail.ru

**For citation:** Kerimzade G. S., Mamedova G. V. Analysis of parameters of electric devices with levitation elements. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 12. P. 1067—1071 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-12-1067-1071